

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311>

УДК 621.311

Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ*

О. В. Марченко¹⁾, С. В. Соломин¹⁾

¹⁾Институт систем энергетики имени Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (Иркутск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Систематизированы технико-экономические показатели возобновляемых (солнечных и ветровых) и невозобновляемых источников энергии с учетом интервала их неопределенности для условий стран СНГ. Основное внимание уделено России и государствам Центральной Азии – Казахстану, Киргизии, Таджикистану, Туркмении, Узбекистану, где имеются наиболее благоприятные условия для развития солнечной и ветровой энергетики. Проведено сравнение возобновляемых и невозобновляемых источников энергии по критерию стоимости вырабатываемой электроэнергии. Показано, что плата за выбросы парниковых газов повышает конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций на энергетических рынках. В случае благоприятных для возобновляемой энергетики условий солнечные и ветровые установки в ряде районов могут вырабатывать дешевую электроэнергию стоимостью 3–5 цент./(кВт·ч). При таких показателях они могут быть конкурентоспособными без дополнительных мер стимулирования их внедрения. С помощью математической модели REM-2 (Renewable Energy Model) проведено сравнение энергетических источников разных типов с учетом системных эффектов. Система электроснабжения включает фотоэлектрические преобразователи, ветроэлектрические установки с возможностью краткосрочного аккумулирования и потребления электроэнергии от дублирующего энергетического источника. Выполнено моделирование режимов работы фотоэлектрических преобразователей и ветротурбин по времени (часам) для разных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра. Определены оптимальные соотношения между производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами, а также предпочтительный уровень потребления электроэнергии из сети при различных климатических и экономических условиях. Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в странах СНГ, в первую очередь в России (за исключением северных районов) и государствах Центральной Азии.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, ветроэлектрические установки, СНГ, Россия, Центральная Азия, экономическая эффективность, конкурентоспособность

Для цитирования: Марченко, О. В. Конкурентоспособность солнечных и ветровых электростанций в странах СНГ / О. В. Марченко, С. В. Соломин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 301–311. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311>

Адрес для переписки

Марченко Олег Владимирович
Институт систем энергетики имени
Л. А. Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук
ул. Лермонтова, 130,
664033, г. Иркутск, Российская Федерация
Тел.: +7 3952 500-646 (добавочный 448)
marchenko@isem.irk.ru

Address for correspondence

Marchenko Oleg V.
Melentiev Energy Systems Institute
of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences
130, Lermontova str.,
664033, Irkutsk, Russian Federation
Tel.: +7 3952 500-646 (additional 448)
marchenko@isem.irk.ru

* Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.6.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310447-3.

Competitiveness of Solar and Wind Power Plants in the Countries of the Commonwealth of Independent States

О. В. Марченко¹⁾, С. В. Соломин¹⁾

¹⁾Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russian Federation)

Abstract. Techno-economic indicators of renewable (solar and wind) and non-renewable energy sources are systematized, taking into account the interval of their uncertainty for the conditions of the countries of the Commonwealth of Independent States (CIS). The main attention was paid to Russia and the countries of Central Asia (Kazakhstan, Kyrgyzstan, Tajikistan, Turkmenistan and Uzbekistan), where there are the most favorable conditions for the development of solar and wind energy. A comparison of renewable and non-renewable energy sources by the criterion of the cost of generated electricity has been made. It is shown that the payment for greenhouse gas emissions increases the competitiveness of solar and wind power plants in the energy markets. Under favorable conditions for renewable energy, solar and wind installations in some areas can produce cheap electricity at a cost of 3–5 cents/(kW·h). With such values, they can be competitive without additional measures to stimulate their implementation. Using the mathematical model REM-2 (Renewable Energy Model), energy sources of different types were compared taking into account system effects. The power supply system consists of photovoltaic converters, wind turbines that enable the possibility of short-term accumulation of electricity and power consumption from a backup power source. Modeling of photoelectric converters and wind turbines operating modes was performed by time (hours) for different values of solar radiation arrival and wind speed. The optimal ratios between electricity production by photovoltaic converters and wind turbines, as well as the optimal level of electricity consumption from the network under different climatic and economic conditions, were determined. The economic efficiency of joint use of solar and wind energy in the CIS countries, primarily in Russia (with the exception of the northern regions) and the countries of Central Asia, is shown.

Keywords: photovoltaic converters, wind turbines, CIS, Russia, Central Asia, economic efficiency, competitiveness

For citation: Marchenko O. V., Solomin S. V. (2020) Competitiveness of Solar and Wind Power Plants in the Countries of the Commonwealth of Independent States. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 63 (4), 301–311. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-301-311> (in Russian)

Введение

С целью предотвращения негативного влияния энергетики на климатическую систему во многих странах мира предпринимаются меры, направленные на уменьшение выбросов в атмосферу парниковых газов, в первую очередь диоксида углерода CO₂ [1]. Особое значение в связи с этим придается развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [2–4].

Для стимулирования внедрения ВИЭ используются различные методы: введение фиксированных тарифов на продажу электроэнергии от энергоисточников на возобновляемых энергоресурсах, субсидии инвесторам (компенсация капиталовложений), гарантии возврата инвестиций, установление квот с введением «зеленых сертификатов» и др. Кроме этого, для энергоисточников на органическом топливе вводятся налоги на выбросы CO₂ (carbon tax) и системы торговли квотами (Emissions Trading Systems, ETS). Величина налога в разных государствах составляет от 1 до 127 дол./т CO₂ [5].

В странах СНГ введение экологического налога в настоящее время не рассматривается, но это возможно в более отдаленной перспективе.

В статье анализируются конкурентоспособность и условия для развития солнечных и ветровых электростанций в России и сопредельных странах (рис. 1). Ожидается, что между ними будут развиваться межгосударственные электрические связи, которые дадут как экономический, так и экологический эффект [6], в том числе благодаря широкомасштабному внедрению ВИЭ.

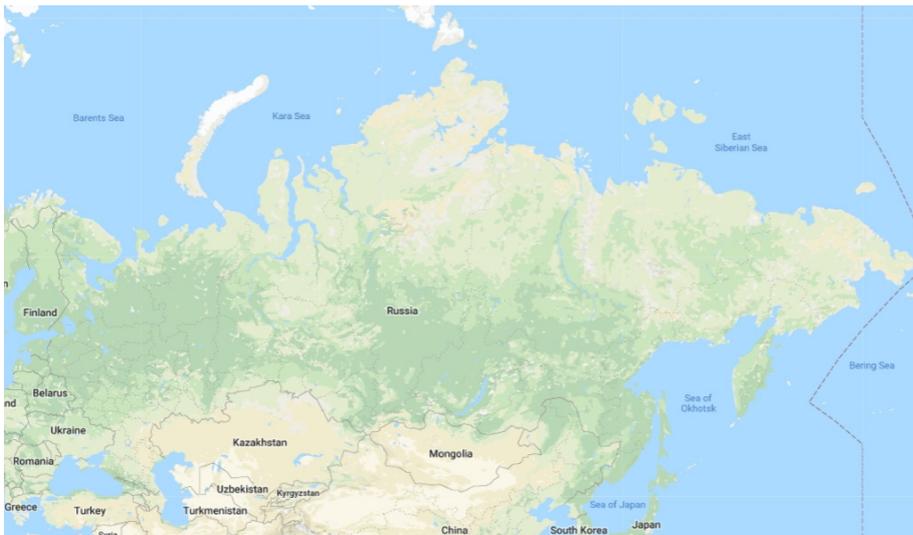


Рис. 1. Карта России и сопредельных стран (Google Maps)

Fig. 1. The map of Russia and neighboring countries (Google Maps)

Наиболее перспективное направление развития межгосударственных электрических связей – южное, предусматривающее объединение электроэнергетических систем России, стран Центральной Азии и Китая. В этом регионе также имеются достаточно благоприятные условия для развития солнечной и ветровой энергетики.

Современное состояние развития возобновляемых источников энергии в странах СНГ

Информация о масштабах использования ВИЭ в мире и странах СНГ представлена в табл. 1 [7]. В последнее десятилетие среднегодовой прирост мощностей ветровых электростанций (ВЭС) в мире составляет около 15 %, солнечных электростанций (СЭС) – более 40 %.

Мировым лидером по развитию ВИЭ является Китай. По состоянию на конец 2018 г. в КНР сосредоточено около 30 % суммарной мощности ВИЭ в мире, в том числе 36 % солнечной и 33 % ветровой энергетики. В странах Центральной Азии существенная роль в производстве электроэнергии принадлежит гидроэнергетике, и лишь в Казахстане строятся солнечные и ветровые электростанции.

Таблица 1

Установленные мощности возобновляемых источников энергии, 2018 г.

Installed capacity of renewable energy sources, 2018

Страна	ГЭС, МВт	СЭС, МВт	ВЭС, МВт	Биоэнергия, МВт	Всего*, МВт
Мир,	1295317	486085	563659	117828	2356346
в том числе Китай	322871	175030	184665	13235	695831
Страны СНГ					
Россия	52579	584	102	1370	54710
Беларусь	95	154	101	107	457
Молдавия	64	4	27	12	107
Азербайджан	1249	36	66	43	1394
Армения	1333	17	3	0	1353
Казахстан	2756	209	121	1	3088
Киргизия	3689	0	0	0	3689
Таджикистан	5632	0	0	0	5632
Туркмения	1	0	0	0	1
Узбекистан	1854	4	1	0	1858
* Включая геотермальные и приливные электростанции.					

Согласно анализу Международного энергетического агентства, в 2019 г. установленные мощности ВИЭ увеличились на 200 ГВт, из которых 115 ГВт составили СЭС и более 50 ГВт – ВЭС. Предполагается, что в период 2019–2024 гг. мощности ВИЭ для двух рассмотренных сценариев возрастут еще на 1200–1500 ГВт, т. е. в 1,5–1,6 раза по сравнению с 2018-м [8]. Около 40 % мирового прироста мощности ВИЭ придется на Китай, который еще более укрепит мировое лидерство в области возобновляемой энергетики. Также быстро будут расти мощности ВЭС и особенно СЭС с фотоэлектрическим преобразованием энергии. В период до 2024 г. прогнозируется прирост мощностей фотоэлектрических преобразователей от 697 до 877 ГВт [8].

Страны СНГ существенно отстают от общемирового тренда интенсивного развития и внедрения возобновляемых источников энергии. В России лишь в последние несколько лет при поддержке государства начались вводы фотоэлектрических преобразователей и ветровых турбин. В 2013 г. Программой Правительства Российской Федерации по стимулированию развития ВИЭ была поставлена задача ввести в действие и подключить к энергосистеме 1,52 ГВт фотоэлектрических установок и 3,6 ГВт ветротурбин. Для этого предлагалось использовать экономический механизм стимулирования инвесторов, основанный на гарантиях возврата вложенных средств с прибылью 15 %.

Пять стран СНГ (Россия, Беларусь, Казахстан, Армения, Киргизия) являются членами Евразийского экономического союза (ЕАЭС). Внутри этой организации создана Евразийская экономическая комиссия (ЕЭК). В рамках ЕАЭС и СНГ обсуждается тема повышения энергоэффективности и развития ВИЭ на евразийском пространстве.

В настоящее время ЕЭК разрабатывает проект «Стратегических направлений развития евразийской экономической интеграции до 2025 года». В этом документе большое внимание уделяется определению основных направлений проведения скоординированной энергетической политики в области энергосбережения, энергоэффективности, использования ВИЭ и охраны окружающей среды.

В Республике Беларусь накоплен определенный опыт в развитии солнечной и ветровой энергетики, который может быть использован в других странах СНГ. По данным ЕАК, к 2021 г. в Беларуси планируется увеличение электрических мощностей ВИЭ до 635 МВт [9].

Постановка задачи

Цель исследований авторов – оценка конкурентоспособности электростанций разных типов и влияния на нее ограничения выбросов диоксида углерода, а также определение оптимальной структуры ветросолнечных электростанций для разных сочетаний экономических и климатических условий России и сопредельных стран.

Для предварительной оценки и сравнения экономической эффективности следует определить удельные затраты на производство электроэнергии (ее стоимость) для энергоисточников разных типов. Также необходимо учесть влияние системных эффектов, возникающих вследствие взаимодействия энергоисточников между собой и с окружающей средой, дополнительных условий и ограничений. Оптимальная структура системы электроснабжения выбиралась из решения задачи математического программирования: минимизация затрат с учетом балансов первичной, вторичной и конечной энергии и ряда дополнительных условий и ограничений (на уровне электропотребления, установленные мощности энергоисточников, режимы работы аккумуляторов и энергоисточников, дублирующих стохастическую выработку ВИЭ, и др.). Для расчетов использовали математическую модель REM-2, в которой учитывалось изменение выработки электроэнергии солнечных и ветровых установок по часам суток и сезонам года. Подробно модель описана в [10].

Рассматриваемая система электроснабжения приведена на рис. 2.

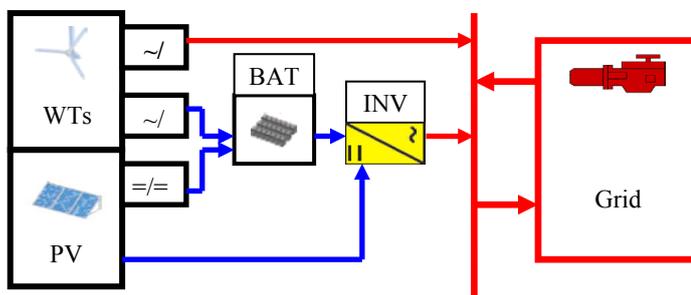


Рис. 2. Схема энергосистемы: WTs – ВЭУ; PV – ФЭП; БАТ – аккумуляторы; INV – инвертор; Grid – сеть, дублирующие энергоисточники

Fig. 2. Diagram of the power system: WTs – wind turbines; PV – solar photovoltaics; BAT – batteries; INV – inverter; Grid – network, back up energy sources

Система состоит из фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), ветроэлектрических установок (ВЭУ) с возможностью краткосрочного аккумулирования электроэнергии. Система включает в себя контроллеры заряда аккумуляторных батарей (АБ), преобразователи напряжения, средства сопряжения с сетью (сетевые инверторы (СИ)) и дублирующий энергоисточник, условно названный «Сеть». В случае недостаточной выработки ВИЭ электроэнергия поступает от внешнего источника по заданной цене. Избыток электроэнергии продается в сеть по той же цене.

Стоимость электроэнергии

При сравнении энергетических технологий в качестве критерия часто используют стоимость энергии. Она равна удельным затратам на производство энергии и одновременно представляет собой ее минимальную цену, при которой проект энергоснабжения остается эффективным. Стоимость можно представить в виде суммы слагаемых, учитывающих затраты на строительство и эксплуатацию установки, затраты на топливо и плату за выбросы вредных веществ [11].

Первая составляющая стоимости электроэнергии прямо пропорциональна удельным капиталовложениям k и обратно пропорциональна коэффициенту использования установленной мощности CF (КИУМ) и зависит от коэффициента возврата капитала F , годовой нормы дисконта d , сроков строительства ΔT и службы T , ежегодных условно постоянных издержек μ , затрат энергии на собственные нужды β . Топливная составляющая прямо пропорциональна цене топлива p и обратно пропорциональна КПД η . Для учета платы за выбросы цена топлива заменяется на произведение коэффициента эмиссии a на цену выбросов диоксида углерода p^* . Для определения стоимости электроэнергии использовали следующую формулу [11]:

$$S = \left[F \frac{e^{\sigma \Delta T} - 1}{\sigma \Delta T} + \mu \right] \frac{k}{CFH(1-\beta)} + \frac{p}{8,15 \cdot 10^3 \eta} + \frac{ap^*}{8,15 \cdot 10^3 \eta},$$

где $F = \sigma / (1 - e^{\sigma T})$; $\sigma = \ln(1 + d)$; H – количество часов в году.

Проведение расчетов

Экономическая эффективность и конкурентоспособность ФЭП и ВЭУ определяются в первую очередь технико-экономическими показателями энергоустановок, ценой электроэнергии дублирующего энергоисточника и коэффициентом использования установленной мощности. Величина этого коэффициента для ФЭП зависит от прихода солнечной радиации на поверхность солнечной панели, а для ВЭУ – от скорости ветра на высоте оси ротора. Ориентировочные значения КИУМ для стран СНГ приведены на рис. 3. Предполагается, что СЭС имеют оптимальный угол наклона па-

нелей с соответствующей системой слежения за Солнцем, а высота башни ВЭУ превышает 100–120 м [3, 4, 12].

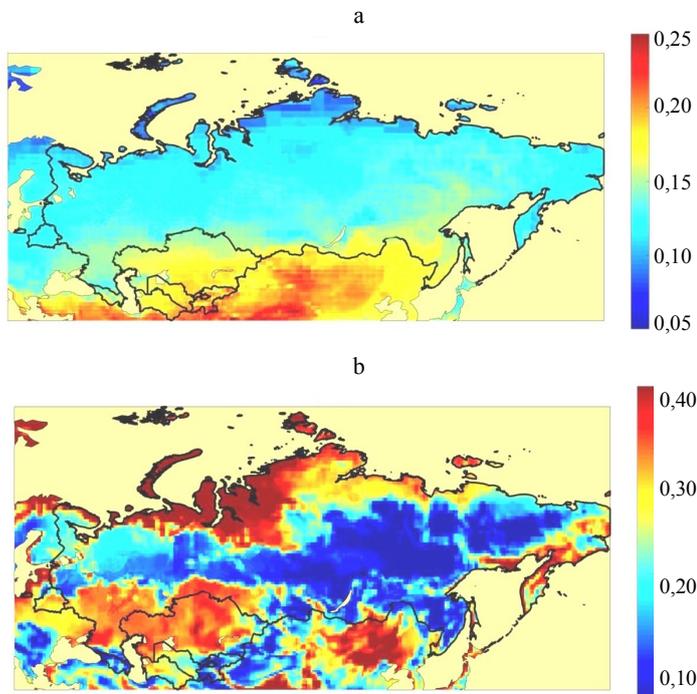


Рис. 3. Коэффициент использования установленной мощности для солнечных (а) и ветровых (б) электростанций для России и сопредельных стран

Fig. 3. The capacity factor of solar (a) and wind (b) power plants for Russia and neighboring countries

Из рис. 3 видно, что в Республике Беларусь ФЭП будут работать с КИУМ не более 0,15, а ВЭУ – при его значении 0,30–0,35. Наилучшие условия для одновременного развития как солнечной, так и ветровой энергетики в странах СНГ характерны для южных регионов России и государств Центральной Азии. В ряде районов этих стран КИУМ для ФЭП может достигать 0,20–0,25, для ВЭУ превышать 0,40 [12]. В связи с этим основные расчеты приведены именно для таких регионов.

При оценке стоимости электроэнергии рассматривались два варианта:

- 1) неблагоприятный для возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и благоприятный для ТЭС на органическом топливе;
- 2) благоприятный для ВИЭ и неблагоприятный для ТЭС.

Варианты отличаются значениями КИУМ для ВИЭ в соответствии с климатическими факторами [12] и другими технико-экономическими характеристиками (табл. 2). В табл. 2 показатели заданы в виде интервалов неопределенности.

В первом варианте плата за выбросы равна нулю, во втором – 30 дол./т CO_2 во всех рассматриваемых странах. Коэффициенты эмиссии приняты в соответствии с данными [13], норма дисконта равна 5 %.

Таблица 2

Технико-экономические показатели электростанций
Technical and economic indicators of power plants

Электростанция	k , дол./кВт	η , %	CF	p , дол./т у. т.
Россия				
Угольная	2000–2200	40–45	0,75–0,80	60–70
Газовая	1000–1100	50–55	0,70–0,80	100–120
ВЭС	1500–2000	25–30	0,17–0,40	0
СЭС (ФЭП)	1400–2000	12–15	0,13–0,17	0
Центральная Азия				
Угольная	900–1500	40–45	0,75–0,80	60–70
Газовая	800–1000	50–55	0,70–0,80	90–110
ВЭС	1300–1500	25–30	0,21–0,36	0
СЭС (ФЭП)	1100–1400	12–15	0,16–0,25	0

В приведенных странах различаются средние тарифы на электроэнергию. По данным сайта GlobalPetrolPrices.com, в 2019 г. они составляли 4–5 цент./(кВт·ч) в Центральной Азии и 7 цент./(кВт·ч) в России (для сравнения: 4 цент./(кВт·ч) в Азербайджане; 8 цент./(кВт·ч) в Беларуси, Армении, Китае, Индии; 11 цент./(кВт·ч) в Южной Корее; 28 цент./(кВт·ч) в Японии; 34–35 цент./(кВт·ч) в Германии и Дании) [14].

Результаты расчетов и их анализ

Стоимость электроэнергии для тепловых электростанций (ТЭС) на органическом топливе (минимальной для угольных или газовых ТЭС) и для возобновляемых источников энергии в России и странах Центральной Азии приведена на рис. 4.

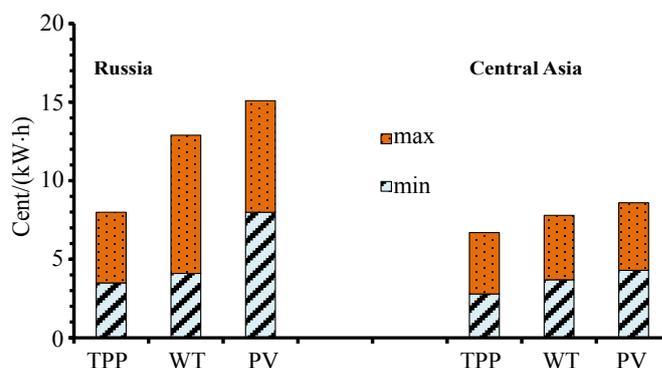


Рис. 4. Стоимость электроэнергии для энергоисточников разных типов в России и странах Центральной Азии: TPP – тепловые электростанции; WT – ветроэлектрические установки; PV – фотоэлектрические преобразователи

Fig. 4. The cost of electricity for energy sources of various types in Russia and Central Asia: TPP – thermal power plants; WT – wind turbines; PV – solar photovoltaics

Из рис. 4 видно, что с учетом платы за выбросы диоксида углерода интервалы неопределенности стоимости электроэнергии тепловых, ветровых и солнечных электростанций пересекаются. Это свидетельствует о том, что

при определенных условиях ВЭС и СЭС конкурентоспособны с электростанциями на органическом топливе.

В условиях Центральной Азии СЭС могут работать с коэффициентом использования установленной мощности около 0,25 и вырабатывать электроэнергию стоимостью 3–5 цент./(кВт·ч). При таких показателях ВЭУ и СЭС могут быть конкурентоспособны с ТЭС без дополнительных мер стимулирования их внедрения.

Следует отметить, что в условиях Республики Беларусь ФЭП могут вырабатывать электроэнергию стоимостью 9–12 цент./(кВт·ч), а ВЭУ – 4–6 цент./(кВт·ч). Это свидетельствует о том, что ветроэнергетика является практически конкурентоспособной с ТЭС, а солнечная энергетика станет экономически эффективной при введении платы за выбросы диоксида углерода.

Расчеты стоимости электроэнергии позволяют предварительно оценить эффективность применения ФЭП и ВЭУ. При работе в системах автономного и централизованного электроснабжения возникают системные эффекты, обусловленные совместной работой ФЭП, ВЭУ и дублирующих источников электрической энергии. Для их учета используется математическая модель.

Результаты расчета оптимального соотношения выработки электроэнергии между ФЭП и ВЭУ на модели REM-2 при разных ценах на электроэнергию (7 цент./(кВт·ч) в России и 5 цент./(кВт·ч) в Центральной Азии) от сетевого дублирующего источника и различных климатических условиях приведены на рис. 5. Использовались характеристики солнечной радиации и ветра, приведенные в соответствующих выпусках справочников по климату для России, Казахстана и Средней Азии. Отдельно рассмотрены северные (North) и южные (South) районы.

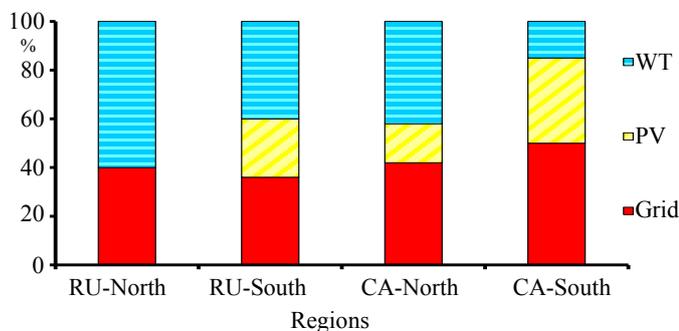


Рис. 5. Оптимальные соотношения выработки электроэнергии

Fig. 5. Optimal ratios of power generation

ФЭП и ВЭУ конкурентоспособны, если вырабатывают более дешевую электроэнергию, чем электроэнергия из сети. По мере увеличения прихода солнечной радиации от северных районов к южным возрастает роль ФЭП. В северных районах России (RU-North) (приход солнечной радиации не превышает $1200 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год) применение ФЭП нецелесообразно, а основную часть выработки обеспечивают ВЭУ. В южных районах (RU-South) при увеличении инсоляции до $1400 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год и снижении средней многолетней скорости ветра с 7 до 6 м/с увеличивается роль ФЭП и дублирующего энергоисточника.

В Центральной Азии в оптимальный план входят три энергоисточника; по мере увеличения прихода солнечной радиации оптимальная доля ФЭП возрастает. С учетом того, что цена электроэнергии в этом регионе не превышает 5 цент. за 1 кВт·ч, относительно велика роль сетевого дублирующего источника. По мере роста тарифов на электроэнергию будет возрастать роль ВЭС (в северных районах) и СЭС (в южных районах) и уменьшаться роль дублирующего источника электроэнергии.

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы технико-экономические показатели электростанций разных типов с учетом интервала их неопределенности для стран СНГ.

2. Проведено сравнение возобновляемых и невозобновляемых источников энергии по критерию стоимости вырабатываемой электроэнергии. Показано, что с учетом платы за выбросы возобновляемые источники энергии могут оказаться конкурентоспособными на энергетических рынках.

3. При благоприятных условиях солнечные и ветровые электростанции в ряде районов могут вырабатывать дешевую электроэнергию стоимостью 3–5 цент./кВт·ч.

4. Дополнительное сравнение энергоисточников разных типов с учетом системных эффектов выполнено с использованием математической модели REM-2 (Renewable Energy Model). Моделирование режимов работы фотоэлектрических преобразователей и ветроэлектрических установок по времени (часам) для разных значений прихода солнечной радиации и скорости ветра позволило определить оптимальные соотношения между установленными мощностями и производством электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями и ветротурбинами. Показана экономическая эффективность совместного использования солнечной и ветровой энергии в России (за исключением северных районов) и государствах Центральной Азии.

5. В странах СНГ формируется скоординированная политика в области развития возобновляемых источников энергии и охраны окружающей среды. Опыт применения ветровой и солнечной энергетики в Республике Беларусь может быть использован в других государствах содружества. В Беларуси ветроэнергетика является практически конкурентоспособной технологией производства электроэнергии. Экономическая эффективность солнечной энергетики будет повышаться в связи с возможным введением налога на выбросы диоксида углерода и других вредных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Renewables 2019. Global Status Report. Paris: REN21, 2019. 336 p.
2. Studies on Competitiveness of Space and Terrestrial Solar Power Plants Using Global Energy Model / L. S. Belyaev [et al.] // International Journal of Global Energy Issue. 2006. Vol. 25, No 1–2. P. 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2006.008386>.
3. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
4. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
5. State and Trends of Carbon Pricing 2019. Washington: World Bank, 2019. 97 p.

6. Россия в Евразийской электроэнергетической интеграции / О. В. Марченко [и др.] // Мировая экономика и международные отношения. 2018. Т. 62, № 6. С. 18–29. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2018-62-6-18-29>.
 7. Renewable Energy Statistics 2019. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 60 p.
 8. Renewables 2019. Analysis and Forecasts to 2024. Paris: IEA, 2019. 204 p.
 9. ЕЭК, ИС СНГ и ЭСКАТО выработают рекомендации по развитию электроэнергетической отрасли [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.eurasiancommission.org/ru/nae/news/Pages/05-11-2019-2.aspx>. Дата доступа: 11.12. 2019.
 10. Marchenko, O. V. Mathematical Modeling and Economic Efficiency Assessment of Autonomous Energy Systems with Production and Storage of Secondary Energy Carriers / O. V. Marchenko // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2010. Vol. 10, No 5. P. 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>.
 11. Марченко, О. В. Исследование влияния экологических ограничений на конкурентоспособность атомных электростанций / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. № 3. С. 20–30.
 12. Bogdanov, D. Eurasian Super Grid for 100 % Renewable Energy Supply: Generation and Storage Technologies in the Cost Optimal Mix / D. Bogdanov, C. Breyer // Neo-Carbon Energy 4th Researchers' Seminar, Oct. 19–20, 2015. P. 41–48.
 13. Energy Outlook for Asia and the Pacific. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015. 543 p.
 14. Electricity Prices, March 2019 [Электронный ресурс]. Access mode: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices. Date of access: 12.12.2019.
- Поступила 21.06.2019 Подписана в печать 04.12.2019 Опубликована онлайн 30.07.2020

REFERENCES

1. *Renewables 2018. Global Status Report*. Paris: REN21, 2019. 336.
2. Belyaev L. S., Marchenko O. V., Filippov S. P., Solomin S. V. (2006) Studies on Competitiveness of Space and Terrestrial Solar Power Plants Using Global Energy Model. *International Journal of Global Energy Issue*, 25 (1–2), 94–108. <https://doi.org/10.1504/IJGEI.2006.008386>.
3. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
4. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).
5. *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. Washington: World Bank, 2019. 97.
6. Marchenko O. V., Podkvalnikov S. V., Savelyev V. A., Solomin S. V., Chudinova L. Y. Russia in Eurasian Electric Power Integration (2018) *World Economy and International Relations*, 62 (6), 18–29. <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2018-62-6-18-29> (in Russian).
7. *Renewable Energy Statistics 2019*. Abu Dhabi: IRENA, 2019. 60.
8. *Renewables 2019. Analysis and Forecasts to 2024*. Paris: IEA, 2019. 204.
9. *EEC, ECEPC of the CIS and ESCATO Will Elaborate Recommendations for the Development of the Electricity Sector*. Available at: <http://www.eurasiancommission.org/ru/nae/news/Pages/05-11-2019-2.aspx>. (Accessed 11 December 2019) (in Russian).
10. Marchenko O. V. (2010) Mathematical Modeling and Economic Efficiency Assessment of Autonomous Energy Systems with Production and Storage of Secondary Energy Carriers. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10 (5), 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>.
11. Marchenko O. V., Solomin S. V. (2015) Investigation of Ecological Constraints Influence on Competitiveness of Nuclear Power Plants. *Nuclear Energy and Technology*, 1 (4), 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2016.02.016>.
12. Bogdanov D., Breyer C. (2015) Eurasian Super Grid for 100 % Renewable Energy Supply: Generation and Storage Technologies in the Cost Optimal Mix. *Neo-Carbon Energy 4th Researchers' Seminar, October 19–20, 2015*, 41–48.
13. *Energy Outlook for Asia and the Pacific*. Mandaluyong City, Philippines: Asian Development Bank, 2015. 543.
14. *Electricity Prices* (March 2019). Available at: https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices. (Accessed 12 December 2019).